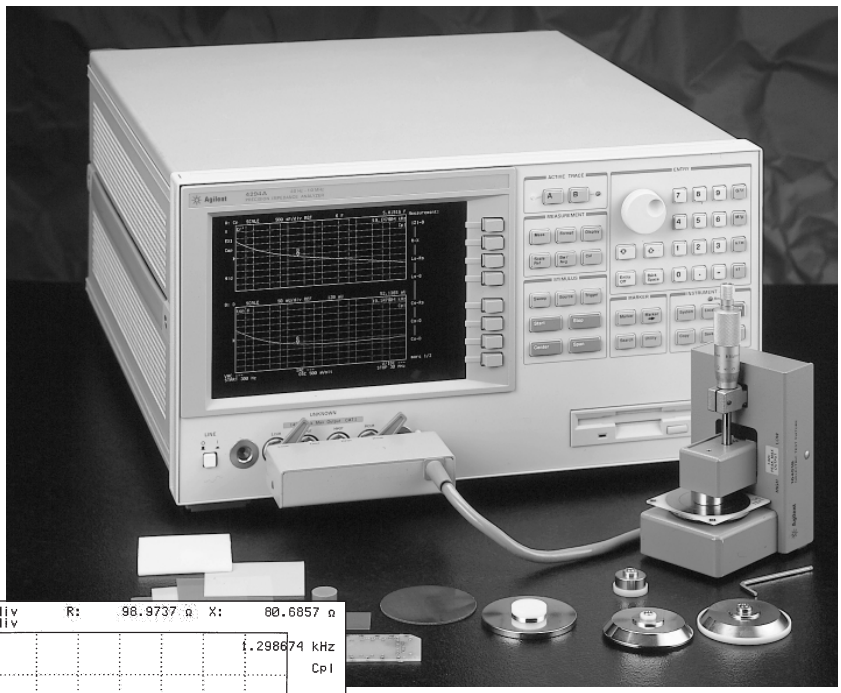
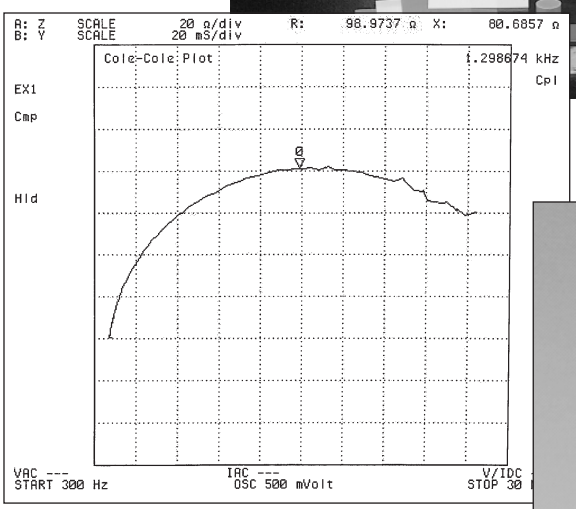
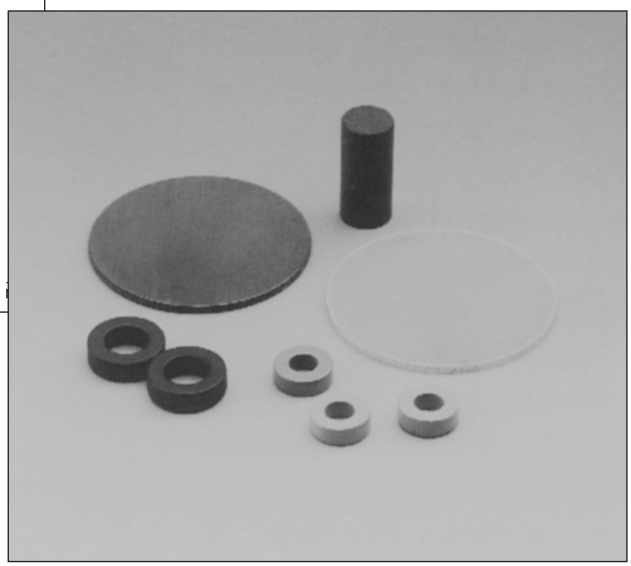
インピーダンス測定技術を用いた誘電体、磁性体材料測定
アプリケーション・ノート 380-3







Agilent Technologies
Innovating the HP Way

インピーダンス測定技術を用いた誘電体、磁性体材料測定
アプリケーション・ノート 380-3

目　次

1. はじめに ……2

2. 誘電率評価 ……2
   2.1. 誘電率の定義 ……2
   2.2. 誘電率の測定方法 ……3
      電極接触法： ……4
      電極非接触法： ……5
   2.3. 誘電率測定システム ……6
   2.4. 16451B誘電体測定用電極を用いた測定システム ……6
   2.5. 16453A誘電体測定電極を用いた測定システム ……11

3. 透磁率評価 ……14
   3.1. 透磁率の定義 ……14
   3.2. 透磁率の測定方法 ……14
   3.3. 透磁率測定システム ……15
   3.4. 16454A磁性材料測定電極を用いた測定システム ……15

4. おわりに ……18

付録 ……19

A. 抵抗率評価 ……19
   A.1. 抵抗率の概念……19
   A.2. 4339Bと16008Bを用いた抵抗率測定システム ……20

B. 液体の誘電率評価 ……23
   B.1. 16452A液体測定電極を用いた測定システム ……23

1．はじめに

電子機器の進歩が早まる現在、回路内に使われる部品材料の特性が、回路全体の特性を決定する上でますます重要になっています。例えば、積層セラミックコンデンサの大容量化では、高誘電率の材料を使用することが不可欠であり、周波数特性を含めた様々な電気的条件での評価を行う必要があります。

また、用途が電子機器以外の分野でも、材料の電気的特性評価が頻繁に行われるようになりました。固体や液体の様々な材料の成分や性質変化の状況が電気的特性を代替えパラメータとして読み取れるためです。

材料評価では、必要十分な測定精度の得られる測定器、測定する材料を接続するための測定治具、測定した基本パラメータから誘電率や透磁率の各パラメータを算出し表示するソフトウェアなど、材料評価に適したシステムが不可欠となります。

本アプリケーションノートでは誘電率、透磁率の測定方法と測定システムについて解説します。その測定技術としては各種の方法が提案されていますが（表1参照）、ここでは以下の様な特長を持つインピーダンス測定技術を用いた方法について解説します。

- 数十Hz-1GHzの広い周波数範囲
- 測定精度が高い
- 測定のための準備が簡単（材料の加工、測定セットアップなど）

2．誘電率評価

2.1．誘電率の定義

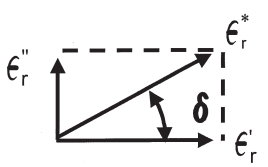
誘電率は、電界が印加された時に蓄えられるエネルギーの大小を表します。図1にその概念を示します。誘電体定数（κ）は複素比誘電率（εr^*）と同じ意味で使われ、この複素比誘電率は真空中の誘電率（ε_0）に対する複素誘電率（ε^*）の比として表わされます。複素比誘電率の実数部（$\varepsilon r'$）は印加された電界から誘電体材料の中に蓄えられるエネルギーの量を表します。複素比誘電率の虚数部（$\varepsilon r''$）は誘電損失と呼ばれ、電界に対するエネルギーの損失、または誘電体材料の電気的な損失を示しています。

複素比誘電率は実数部と虚数部が90度で直交する図1で示されるベクトル図のように表現されます。誘電体材料における誘電損失量の表現には誘電正接tanδが用いられます。これは、複素比誘電率の実数部（$\varepsilon r'$）と虚数部（$\varepsilon r''$）の比を取った値です。一般には誘電率測定といった場合、比誘電率の測定を意味します。

表1　誘電率、透磁率の測定方法と測定技術

測定パラメータ	測定技術	測定法
誘電率	インピーダンス測定	容量法
	ネットワーク測定	反射波法
		Sパラメータ法
		摂動法
		誘電体共振器法
		プローブ法
		フリーベース法
透磁率	インピーダンス測定	インダクタンス法
	ネットワーク測定	8字コイル法
		反射波法
		Sパラメータ法
		摂動法

$$\kappa^* = \varepsilon_r^* = \frac{\epsilon^*}{\epsilon_o} = \underset{\text{(実数部)}}{\varepsilon_r'} - j\,\underset{\text{(虚数部)}}{\varepsilon_r''} = \left(\frac{\epsilon'}{\epsilon_o}\right) - j\left(\frac{\epsilon''}{\epsilon_o}\right)$$



$$\tan\delta = \frac{\varepsilon_r'' \text{ (虚数部)}}{\varepsilon_r' \text{ (実数部)}}$$

$\tan\delta$ = D (損失係数)

κ^* = 誘電定数

ϵ_r^* = 複素比誘電率

ϵ_o = 真空の誘電率 $\left(\frac{1}{36\pi} \times 10^{-9}\ [\text{F/m}]\right)$

図1　複祖素誘電率（$\varepsilon r'$）の定義

2.2. 誘電率の測定方法

インピーダンス測定技術を用いた誘電率の測定では、一般に容量法と呼ばれる技術を用います。その概念を図2に示します。

容量法は概念的には試料（以下、MUT-Material Under Testの略-と記述）を電極で挟むことによってコンデンサを形成し、測定した容量値から誘電率を算出する方法です。このため、測定治具としては誘電体材料を挟むための1組の電極によって構成されます。通常、インピーダンス測定器はベクトル量として容量（C）と損失（D）を測定し、測定器内部あるいは外部に用意されたソフトウエアによって誘電率や誘電損失などを計算します。

図3は実際に測定する際の、電界の発生の様子を表しています。誘電体材料を1組の電極で挟んで単純に測定した場合、図3のように電極間の発生する浮遊容量（エッジ容量）が発生し、容量値は実際よりも大きく見えることになります。このことは等価的には電極面積が実際よりも大きく見えることにも相当します。

エッジ容量による測定誤差に対する有効な解決方法をして、ガード電極を使用することがあげられます。ガード電極は電極の外側に発生する電界を吸収しますので、測定電極間で測定される容量値は実際に誘電体材料に流れた電流のみによるものとなり正確な測定が可能となります。

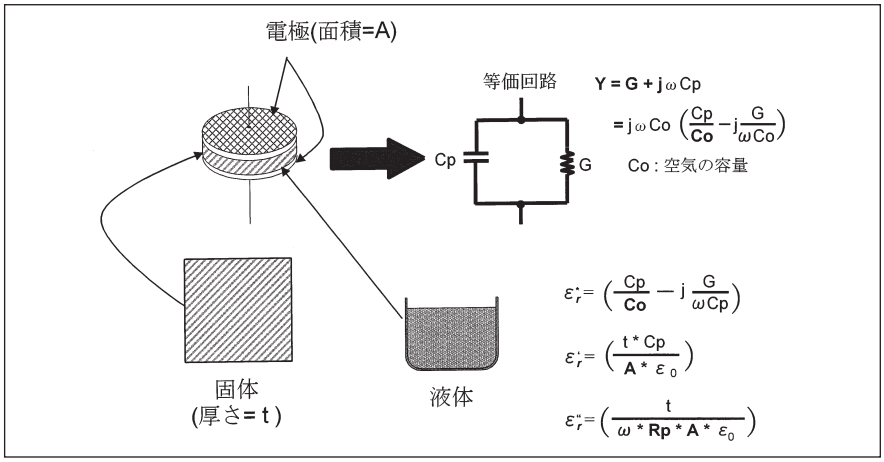


図2　容量法

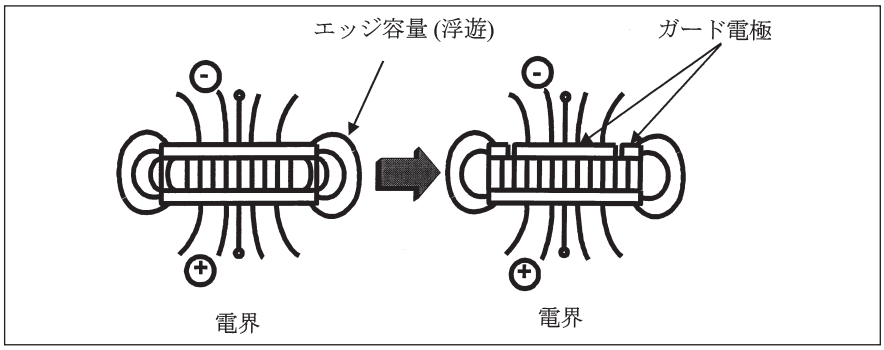


図3　ガード電極の効果

電極接触法：

電極に直接MUTを接触させて容量を測定し、その結果から誘電率を求める方法です（図4参照）。誘電率は以下の式によって算出されます。

Cp ：MUTの等価並列容量［F］
D ：損失係数（測定値）
ta ：MUTの平均の厚み［m］
A ：主電極の面積［m^2］
d ：主電極の直径［m］
ε_0 ：真空の誘電率=8.854×10-12［F/m］

算出式：

$$\varepsilon r = \frac{(ta * Cp)}{(A * \varepsilon_0)} = \frac{(ta * Cp)}{(\pi (\frac{d}{2})^2 * \varepsilon_0)}$$

Dt=D

この方法は材料に面倒な加工を必要としない、測定の操作が簡単という理由で広く用いられています。しかしながら、以下に述べる理由により測定精度の点においては少なからず問題が発生します。

MUTを電極で直接挟む方法では、ＭＵＴの両面を限りなく平行で平らに加工したとしても少なからず空気層が材料と電極の間に形成され、これが測定誤差の原因となります。測定する容量値には、誘電体材料による容量値に直列に存在する空気層の容量値が一緒に測定されるためです。この場合、空気層の厚さと測定誤差の関係は図5に示された式のように示されます。測定誤差はMUTの比誘電率（εr'）、MUTの厚さ（d）、空気層の厚さ（t）の関数となり、その計算結果は表2のようになります。薄い材料と高誘電率の材料において影響が大きくなるということが分かります。

この空気層の問題を解決する方法として、誘電体材料上に薄膜電極を形成する方法があります。この方法ではMUTの上に薄膜を形成するという準備が必要になりますが、空気層の影響なく測定できる最も測定精度の高い方法です。

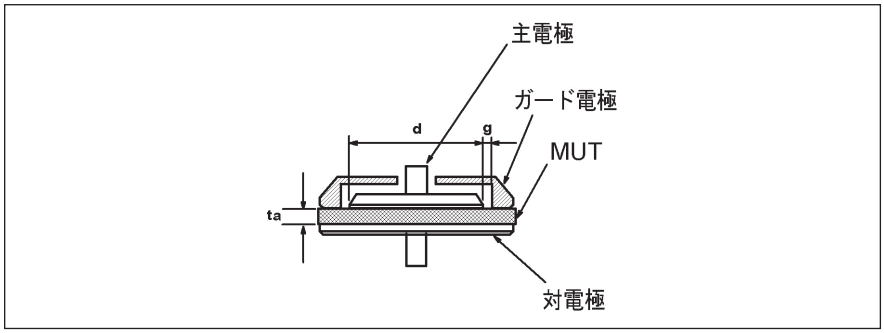


図4　電極接触法

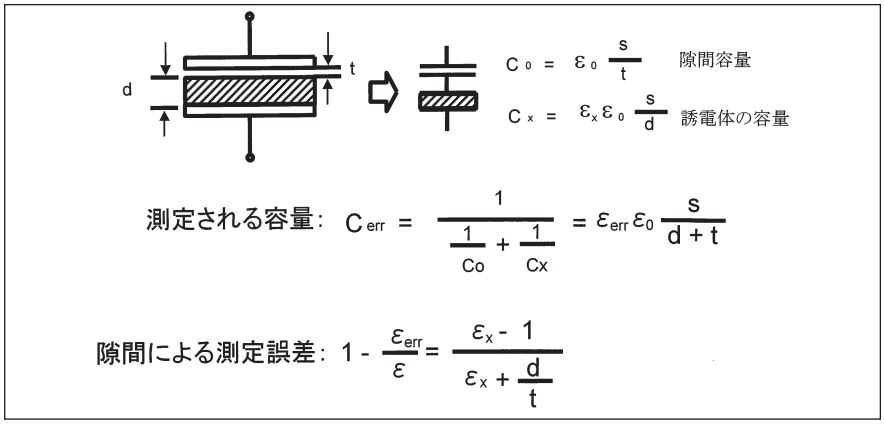


図5　電極間の隙間による測定誤差

表2　MUTと空気層の厚さの比、MUTの比誘電率と測定誤差の関係

t/d ＼ ε'rm	2	5	10	20	50	100
0.001	0.1%	0.4%	1%	2%	5%	9%
0.005	0.5%	2%	4%	9%	20%	33%
0.01	1%	4%	8%	16%	33%	50%
0.05	5%	16%	30%	48%	70%	83%
0.1	8%	27%	45%	63%	82%	90%

電極非接触法：

前述の電極接触法における2つの方法の利点、欠点を補うために開発された方法です。薄膜電極の形成を行う必要はなく、しかも空気層の問題を解決します。MUTを電極間に挿入した時と、していない時の容量値の差分から誘電率を求めます(図6参照)。
ただし、原理上、電極の間隔(tg)はMUTの厚さ(ta)に比べて少しだけ広くとり、その広くした分の間隔(tg-ta)はMUTの厚さ(ta)に比べて十分に小さい必要があるという条件があります。測定には2回の容量測定が必要で、それらの結果を用いて誘電率を計算します。計算式は以下のようになります。

Cs1：MUTを挿入する前の容量[F]
Cs2：MUTを挿入する時の容量[F]
D_1 ：MUTを挿入する前の損失係数
D_2 ：MUTを挿入する時の損失係数
tg ：主電極とガード電極間の隙間
ta ：MUTの平均の厚み[m]

算出式：

$$\varepsilon r = \frac{1}{\left(1-(1-\frac{C_{S1}}{C_{S2}})*\frac{tg}{ta}\right)}$$

$$Dt=D_2+\varepsilon r*(D_2-D_1)*(\frac{tg}{ta}-1)\ (Dt<<1)$$

以上、3つの方法の特長をまとめると表3のようになります。

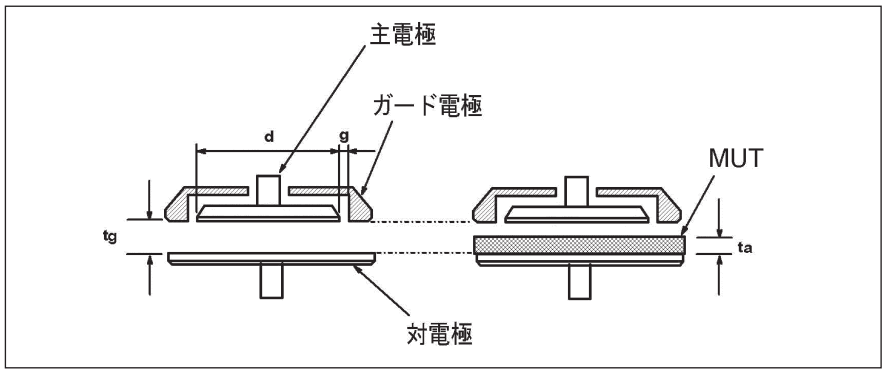


図6　電極非接触法

表3　誘電率測定方法の比較

測定法	電極接触法(薄膜電極なし)	電極非接触法	電極接触法(薄膜電極あり)
測定確度	低い	中間	高い
適応MUT	表面が平らで、平行な固体材料	表面が平らで、平行な固体材料	薄膜電極の形成が必要
測定時の操作性	1回の容量測定から算出	2回の容量測定から算出	1回の容量測定から算出

2.3. 誘電率測定システム

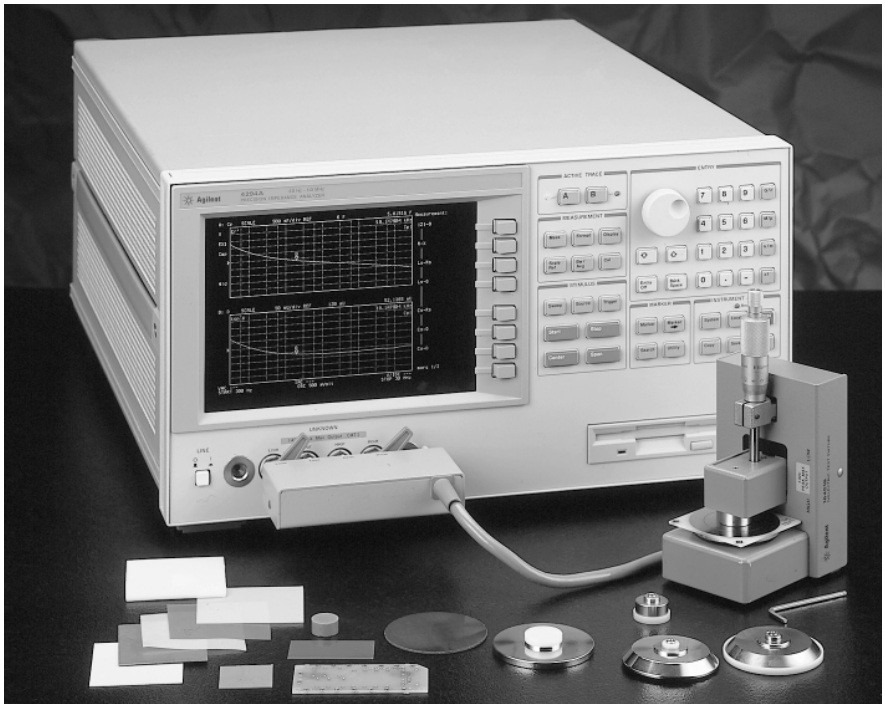
容量法を用いた測定システムとして、2つのシステムについて解説します。1つは、Agilent 16451B誘電体測定用電極を用いた固体材料の数十MHz帯までででの測定方法、もう一つはAgilent 16453A誘電体測定電極を用いた固体材料の1GHzまでのでの測定方法です。それぞれについて、測定治具の内容や測定例を以下の項目に従って解説していきます。

1）特長
2）適応ＭＵＴ
3）治具構造
4）主な仕様
5）使用方法
6）使用上の注意
7）測定例のご紹介

2.4. 16451B誘電体測定用電極を用いた測定システム

2.4.1. 主な特長

- 30MHzまでの周波数範囲での高精度測定が可能
- 電極接触法と電極非接触法、大小2種類のMUTサイズに対応する4種類の電極
- ガード電極によるエッジ容量の問題の解決
- OPEN/SHORTを容易にするアタッチメント
- 4端子対構成をもつすべてのインピーダンス測定器への接続が可能



使用可能測定器：4192A, 4194A（インピータンス測定モード）, 4263A/B, 4268A, 4278A, 4279A, 4284A, 4285A, 4294A

＊上記使用可能測定器は、全てAgilent Technologies Japan, Ltd.の製品です。

2.4.2. 適応MUT

測定可能な誘電体材料は板状(厚さが一定)で表面が滑らかな固体の材料です。測定可能な誘電体材料の大きさは測定方法と使用する電極に依存します。
測定法として電極接触法でかつ薄膜電極をつけない場合は電極AまたはBを選択し、電極接触法でかつ薄膜電極をつける場合は電極CまたはDを使用します。
測定法として電極非接触法を用いる場合は、電極AまたはBを選択します。この時、誘電体材料を数ミリ以上の厚さにする事をお勧めします。
AとB、CとDの違いは電極の直径の違いであり、AとCは大きいサイズのMUT、BとDは小さいサイズのMUTに対応します。これらの電極の大きさは、JIS規格(C6481など)に準拠しています。使用する電極に対するMUTの適応寸法を表4と表5に、各電極の寸法を図7～10に示します。

表4　電極A、B使用時の適応可能MUT寸法

使用主電極	誘電体直径	誘電体厚さ	主電極直径
A	40mm～56mm	t ≦10mm	38mm
B	10mm～56mm	t ≦10mm	5mm

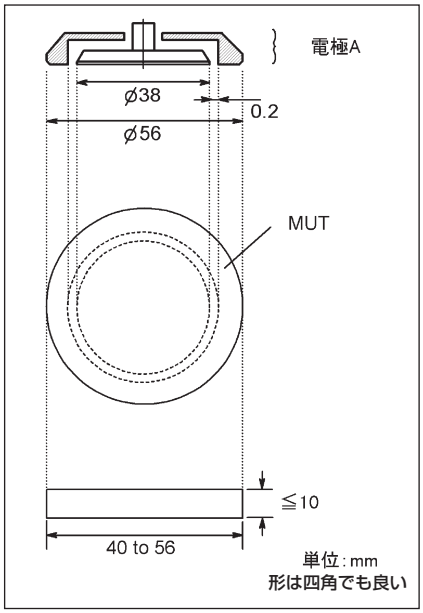


図7　電極Aの形状とサイズ

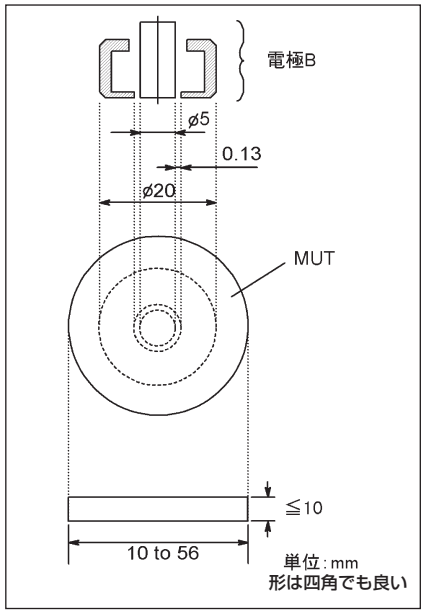


図8　電極Bの形状とサイズ

表5　電極C、D使用時の適応可能MUT寸法

使用主電極	誘電体直径	誘電体厚さ	主電極直径*
C	56mm	t ≦10mm	5～50mm
D	20mm～56mm	t ≦10mm	5～14mm

*誘電体に付ける薄膜主電極直径

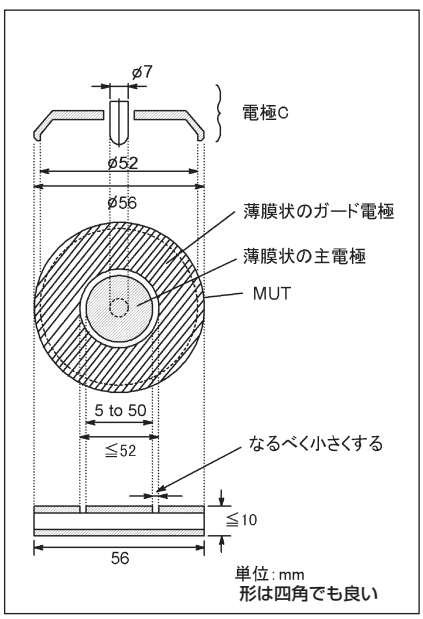


図9　電極Cの形状とサイズ

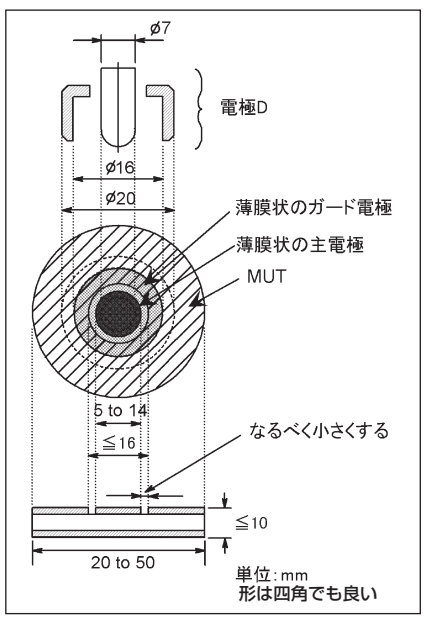


図10　電極Dの形状とサイズ

2.4.3. 治具構造

電極間に発生するエッジ容量による追加誤差の影響を取り除くため、ガード端子をもつ3端子構成が採用されています。図11は16451Bの構造を示しています。

16451Bの電極は、測定器のHighターミナルに接続された対電極、測定器のLowターミナルに接続された主電極、そして、測定器のガード(BNC端子の外皮)に接続されたガード電極から構成されます。ガード電極は主電極を取り囲む形で配置されています。このガード電極が電極の外側を回り込む電界(エッジ容量)を吸収し、MUTの正確な測定を可能にします。

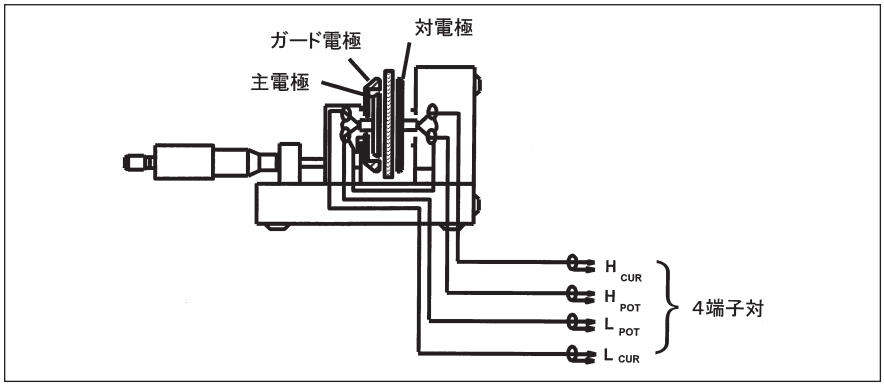


図11　16451Bの構造

2.4.4. 主な仕様

表6.　16451Bの主な仕様

周波数	≦30MHz
最大電圧	42V
温度	0～55℃
端子構成	4端子対、BNCコネクタ
ケーブル長さ	1m
補正	OPEN/SHORT*

*4285Aまたは4294Aを5MHz以上の周波数で使用する場合はOPEN/SHORT補正に加えてLOAD補正も行う必要があります。2.4.5.　使用方法を参照下さい。

表6に16451Bの主な仕様を、図12、図13に4294Aを使用した場合の測定確度を示します。測定確度の詳細については16451B製品カタログ(カタログ番号：11499)を参照下さい。

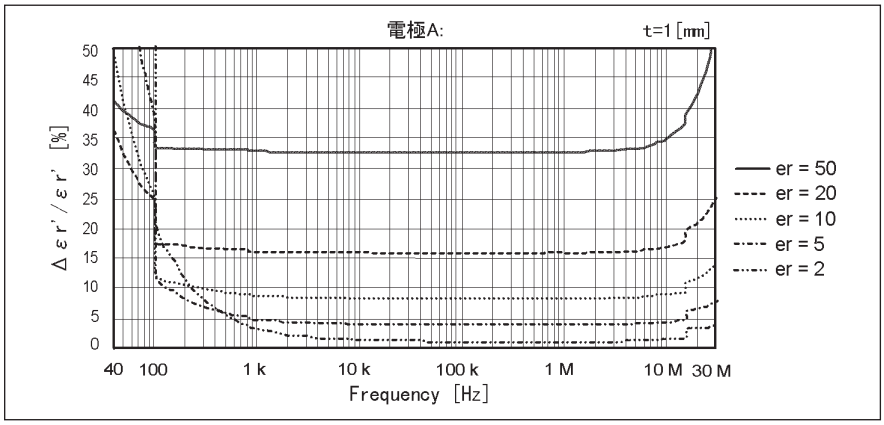


図12　誘電率測定確度（参考データ）

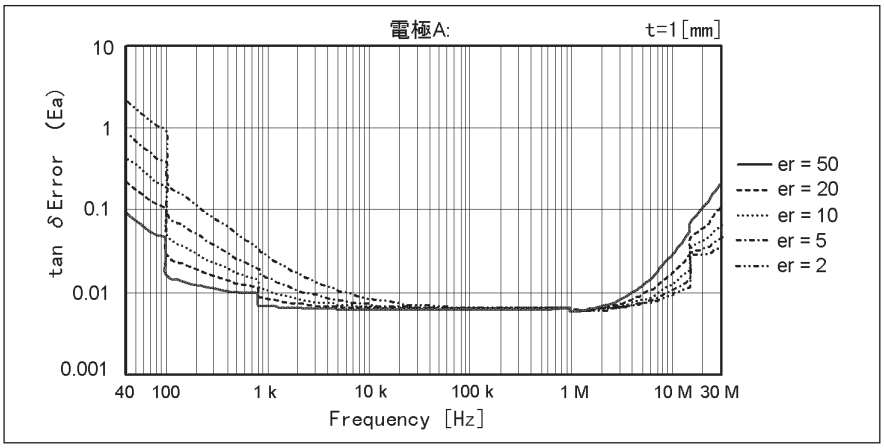


図13　誘電正接測定確度（参考データ）

2.4.5. 使用方法

図14は16451Bを用いた誘電体測定フローチャートを示しています。以下に各ステップについて説明します。

ステップ1．誘電体材料の準備：図7～10を参照の上でMUTを所定の大きさ、形に加工します。薄膜電極による電極接触法を使用して測定する場合は、MUT上に薄膜電極を形成します。

ステップ2．使用電極の装着：適切な電極を選択し、16451Bに装着します。

ステップ3．16451Bの接続：16451Bを測定器のUNKNOWN端子に接続します。

ステップ4．ケーブル長補正：ケーブル長が1mになるように測定器を設定します。設定手順に関しては、使用する測定器の取扱説明書を参照下さい。

ステップ5．平行度調整の為の補正：16451B付属のOPEN/SHORTアタッチメントを用いて、OPENとSHORT補正を行います。

ステップ6．平行度の調整：16451Bでは測定の精度を高めるために、主電極と対電極の平行度を調整する機構が用意されています。これにより、電極接触法では空気層の発生を最小限に押さえるとともに、電極非接触法では均一の厚さの空気層が入るように工夫されています。調整方法は16451Bの取扱い説明書に記載されています。

ステップ7．測定条件の設定：測定周波数、信号レベルなど測定条件の設定を行います。詳しくは使用する測定器の取扱説明書を参照下さい。

ステップ8．16451Bの残留インピーダンスの補正：16451B付属のOPEN/SHORTアタッチメントを用いて、16451Bの残留インピーダンスの補正を行います。

4294Aと4285Aを5MHz以上の周波数帯で使用する場合はLOAD補正が必要となります。数十MHz帯の高周波で16451Bを使用する場合には治具のもつ残留インピーダンスの影響が無視できなくなるためです。

16451Bの周波数特性の補正を行うため、低い周波数（100kHz）で測定した基準値を用い、高周波でのLOAD補正を行います。LOADデバイスとして16451Bの電極に何も挿入しない状態である空気コンデンサを用い、表7の容量値になるよう電極間隔を調整して使用します。空気コンデンサは周波数依存性がないと仮定し、100kHzでの容量値（Cp）、損失（G）を用いて高周波でのロード測定結果をもとに補正を行います。

ステップ9．MUTの接続：電極間にMUTを挿入します。

ステップ10．Cp-D測定：容量（Cp）と損失（D）を測定します。電極非接触法を用いる場合は、このステップにおいてMUTの有無による2回のCp-D測定を行います。

ステップ11．誘電率の算出：2.2．章で解説した電極接触法の誘電率算出式を用いて各パラメータの計算を行います。

測定器として4294Aを用いる場合、これらの測定手順を自動化するためのIBASICプログラムが4294Aの取扱説明書に付属されていますのでご利用ください。

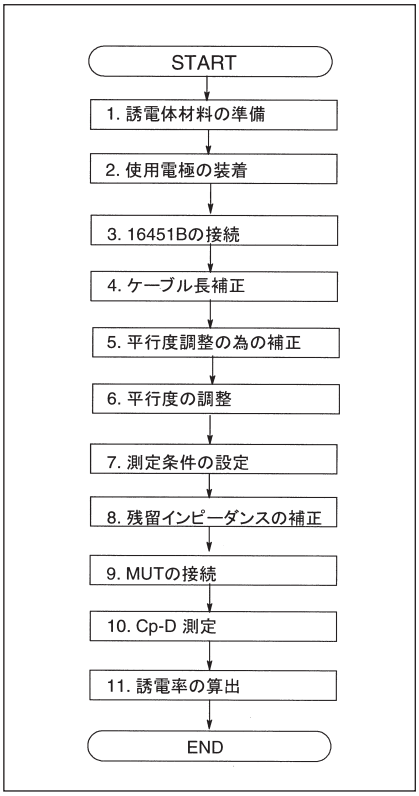


図14　16451B測定手順フローチャート

表7　各電極におけるLOAD値

電極	推進容量＊
A	50pF±0.5pF
B	5pF±0.05pF
C、D	1.5pF±0.05pF

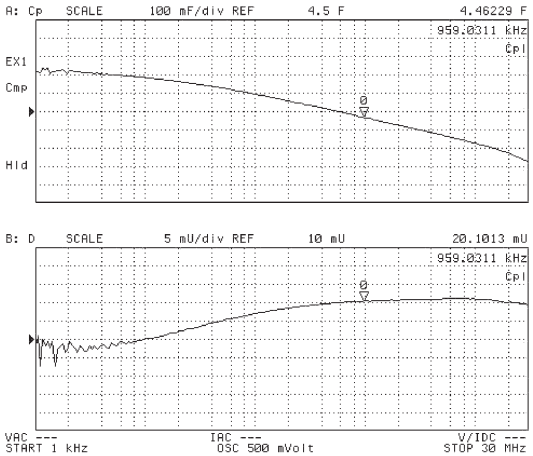
2.4.6. 使用上の注意

繰り返しになりますが、MUTと電極の間にできる空気層の影響を小さくするためには、薄膜電極を用いた電極接触法による測定が有効です（2.2.章参照）。16451Bでは電極C、Dがこの方法を行うための電極として用意されています。

その他の注意点として、力をかけると変形するMUTについては厚さが一定にできないため電極接触法による測定には適しません。この場合は、電極非接触法で測定することをお勧めします。

また、16451Bのマイクロメータは、電極非接触法において正確な間隙を作るために設けられています。電極の装着の具合によって高さが変化するため、電極接触法におけるMUTの厚さの正確な測定には向きません。この場合は、別に用意したマイクロメータやノギスを使用することをお勧めします。

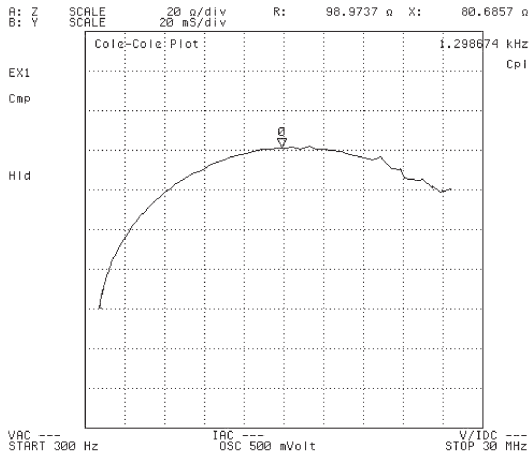
2.4.7. 測定例のご紹介



4294Aの設定：
信号レベル：500mV
周波数：1kHz～30MHz
パラメータ：ε r' vs. tan δ
BW：5
補正：OPEN/SHORT/LOAD
LOAD STD：空気(5pF)

16451Bの設定：
電極：Bタイプ

図15　ガラスエポキシーの周波数特性評価



4294Aの設定：
信号レベル：500mV
周波数：300Hz～30MHz
BW：5
補正：OPEN/SHORT/LOAD
LOAD STD：空気 （1.5pF）

16451Bの設定：
電極：Cタイプ
測定法：電極接触法

図16　セラミック材料のCOLE-COLEプロット

2.5. 16453A誘電体測定電極を用いた測定システム

2.5.1. 特長

- 1MHz～1GHzの広い周波数範囲
- エッジ容量の問題は4291B内蔵のソフトウエアが解決
- -55℃～+200℃での温度特性評価が可能
- OPEN/SHORT/LOAD補正
- 4291B（オプション002材料解析機能付）の内蔵ソフトウエアによりプログラミングなどの必要なく誘電率パラメータの直読が可能。

＊温度特性評価にはオプション013耐熱高インピーダンスヘッドが必要です。オプション013には、高温でも測定精度を維持できる耐熱ケーブルと恒温器のコントロールを行うための、IBASICプログラムが含まれます。

2.5.2. 適応MUT

測定可能なMUTの形状は板状で滑らかな固体の材料となります。図17は適応可能サイズを示しています。

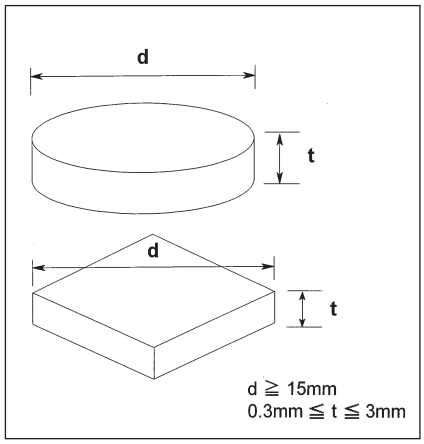
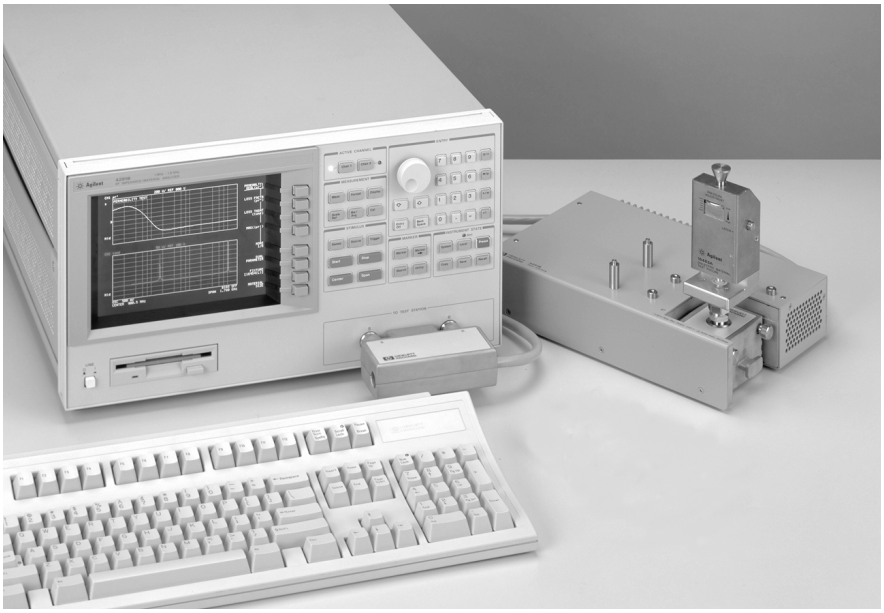


図17　16453A適応可能MUT寸法



使用可能測定器：4291B+16453A（オプション002付き）*

2.5.3. 治具構造

図18は16453Aの構造の概念図を示しています。上部の電極にバネを内蔵し、バネが上からMUTを押さえることによって簡単に材料が固定されます。バネの圧力は調整できる仕組みになっています。

ガード電極がもつ複雑な構造は高周波での特性が悪くなるため、16453Aでは16451Bのようなガード電極を持っていません。、エッジ容量の問題についてはシミュレーションを行った結果をもとに4291Bオプション002上のファームウェアを使用して補正を行います。

また、測定誤差の原因となる測定治具の残留インピーダンスOPEN/SHORT補正だけでは取り除く事ができない為、LOAD補正用としてテフロンが付属されています。

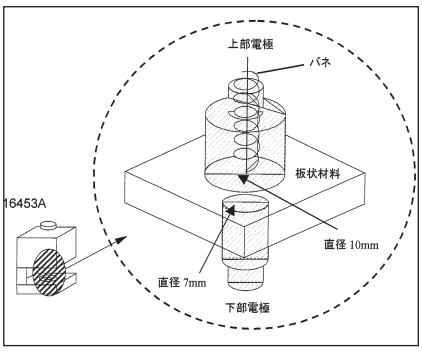


図18　16453A構造

2.5.4. 主な仕様

表8. 16453Aの主な仕様

周波数	1MHz～1GHz
最大電圧	42V
温度	-55℃～+200℃*
端子構成	7mm
補正	OPEN/SHORT/LOAD

*4291B（オプション013付）使用時

図19、図20に16453Aの測定確度を示します。これらの数値は、4291Bも含んだ測定確度として表わされています。詳しい確度式については、4291Bの製品カタログ（カタログ番号：5966-1543E）及び取扱説明書に記載されています。

2.5.5. 使用方法

図21に16453Aを用いた誘電体測定のフローチャートを示します。以下に各ステップについて解説します。さらに詳しい情報は、4291Bの取扱説明書に記載されていますので、参照下さい。

ステップ1．4291Bの校正：4291Bの7mmコネクタ上で校正を行います。

ステップ2．16453Aの接続：16453Aを4291Bの7mm測定端子に接続し、4291BのMEASメニュー上で16453Aを測定治具として選択します。

ステップ3．ロードの厚さ入力：補正を行う前に、付属のロードの厚さを4291Bに入力します。

ステップ4．16453A残留インピーダンスの補正：OPEN/SHORT/LOAD補正を行います。

ステップ5．MUTの厚さの入力：MUTの厚さを入力します。マイクロ・メーターやノギスで測定し入力します。

ステップ6．MUTの接続：電極間にMUTを挿入します。

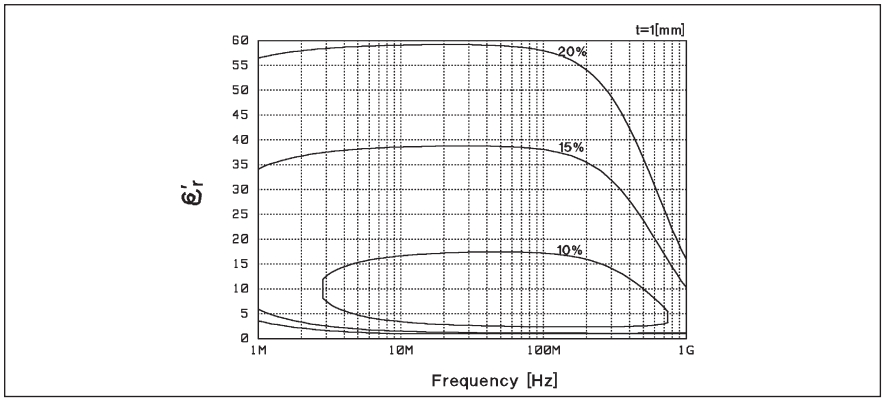


図19　誘電率測定確度（参考データ）

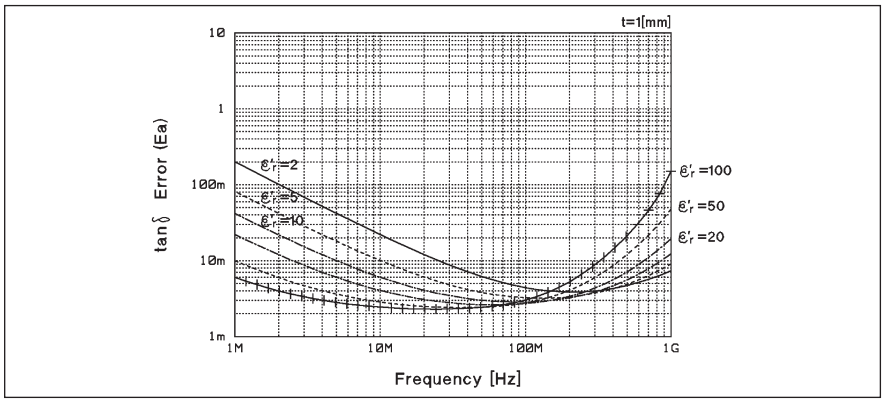


図20　誘電正接測定確度（参考データ）

ステップ7．4291B測定条件の設定：測定周波数、測定パラメータなどの測定条件を設定します。

ステップ8．MUTの測定：測定結果は4291Bの画面に表示されます。マーカ機能などによりデータの解析が可能です。

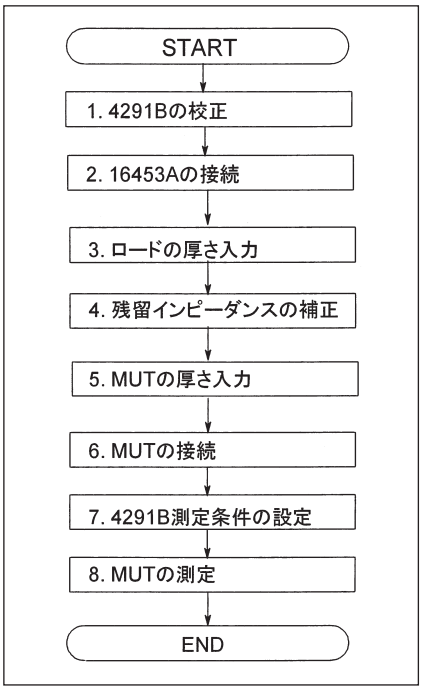


図21　16453A測定手順フローチャート

2.5.6. 使用上の注意

前述の通り、電極とMUTの間にできる空気層の影響が、測定誤差の原因になります。2.2　誘電率の測定法で述べたように、薄い材料高誘電率の材料になるほどその影響は大きくなります。また、表面が粗い材料（図22参照）においても、空気層の影響という意味においては薄い材料と同じ概念で測定誤差を生じます。

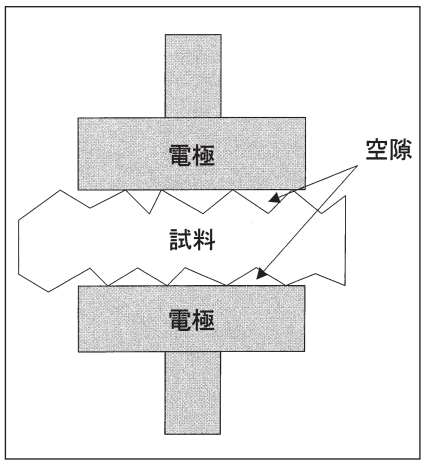


図22　表面が粗い誘電体材料

MUTと電極の間に空気層が入る問題を回避するためには、誘電体材料上に電極を形成する方法があります。その方法を図23に示します。16453Aの電極と大きさ、形状とも同一の電極を誘電体材料に形成します。この場合、MUT上での電極の位置決めが重要であり、16453Aの構造に合うようボードの形を工夫する必要があります。このような工夫により、より精度の高い測定が可能になります。

また、数100μmの薄いMUTを測定する場合に、表面が滑らかで、圧力によって変形しない材料であれば、簡易的に、測定するMUTを3−4枚重ねることで空気層の影響を低減し、測定精度の改善を図る方法もあります。

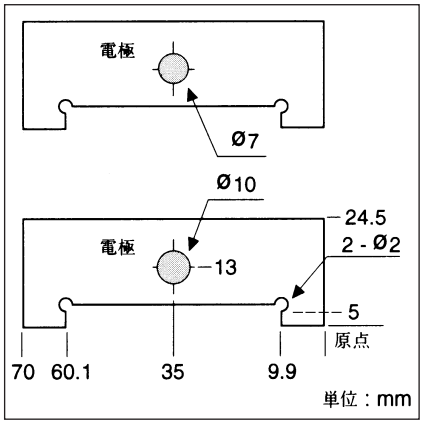


図23　形成する電極形状

その他の注意点としては、バネ圧力を調整する機能についての考慮の必要性があります。前述のように電極とMUTの間にできる空気層の混入を最小にするために、バネ圧は最大にして使用することをお勧めします。ただし、圧力によって変形するMUTの測定には、圧力が高すぎると厚さが変化して正しく測定できなくなる可能性があります。この場合は、MUTの変形がなくなる程度までバネ圧を弱めに調整して下さい。

2.5.7. 測定例のご紹介

4291Bと16453Aを用いたBTレジンの周波数特性と温度特性評価の測定結果を下記に示します。

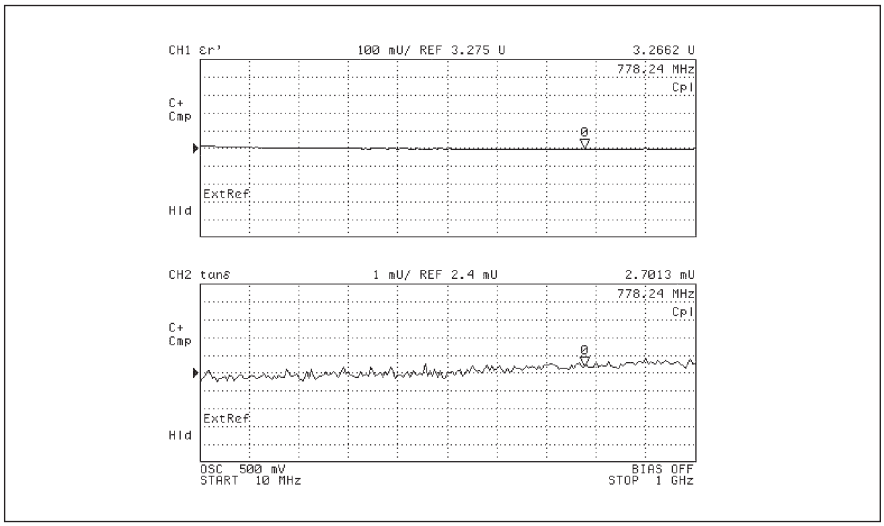


図24　BTレジンの周波数特性

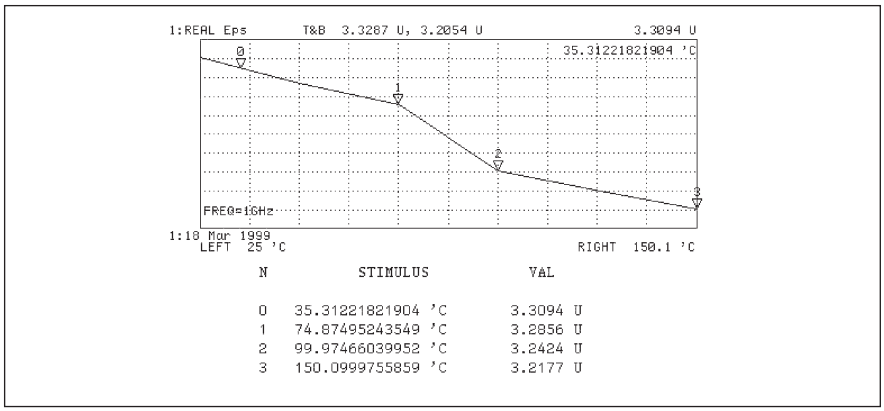


図25　BTレジンの温度特性評価

3. 透磁率評価

3.1. 透磁率の定義

透磁率は、磁界が印可されたときに、蓄えられるエネルギーの大小を表します。その概念を図26に示します。複素比透磁率（μr*）はエネルギー蓄積量を表す実数部（ur'）とエネルギー損失量を表す虚数部（ur"）から成り、真空の透磁率（μ0）に対する複素透磁率（μ*）の割合として与えられます。磁性体材料の損失の度合いを表わすパラメータとしては、損失係数tanδが用いられます。これは複素比透磁率の実数部（μr'）と虚数部（μr"）の比を取った値です。一般に透磁率測定といった場合、比透磁率の測定を意味します。

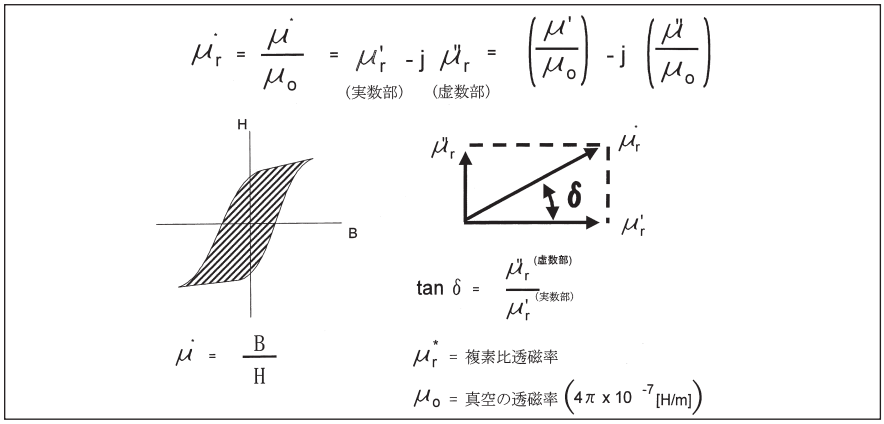


図26　複素透磁率（μ*）の定義

3.2. 透磁率の測定方法

一般に、トロイダルなど閉磁路磁心でのコイルの自己インダクタンスから求められる透磁率は実効透磁率と呼ばれます。この実効透磁率は、コアに線を巻き、その両端のインダクタンス値を測定することで求められます。これらの測定はインピーダンス測定技術で行うことが可能であり、本アプリケーションノートでもこの方法を用いた測定について論じていきます。インダクタンス値からは以下の算出式により実効透磁率が導き出されます。

$$\mu e' = \frac{L*l}{\mu_0*N^2*A}$$

$$\mu e'' = \frac{l*(Reff-Rw)}{\mu_0*N^2*\omega*A}$$

Reff：巻線を含めた損失抵抗
Rw　：巻線だけの損失抵抗
N　　：巻数
l　　：トロイダルの平均磁路長［m］
A　　：トロイダルの断面積［m^2］
ω　　：2*π*f（周波数）
μ_0　：$4\pi x10^{-7}$［H/m］

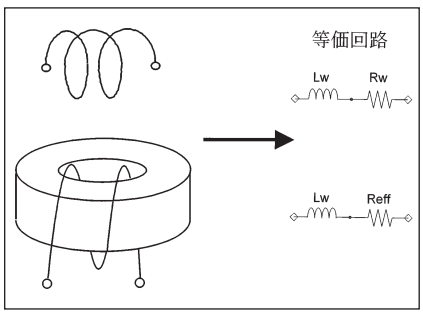


図27　透磁率の測定法

印加された磁界に依存して、ヒステリシスカーブのどの部分の透磁率を測定しているかによっていくつかの透磁率の概念がありますが、この方法で求められる透磁率は初透磁率（H→0の場合の透磁率）を測定していることに相当します（JIS規格2561Cの定義によると印加された磁界Hが0.8A/mよりも小さければ初透磁率になります）。
なお、上記の測定法で測定される透磁率（すなわち、実効透磁率かつ初透磁率）を、次章以降では単に透磁率と呼ぶことにします。

3.3. 透磁率測定システム

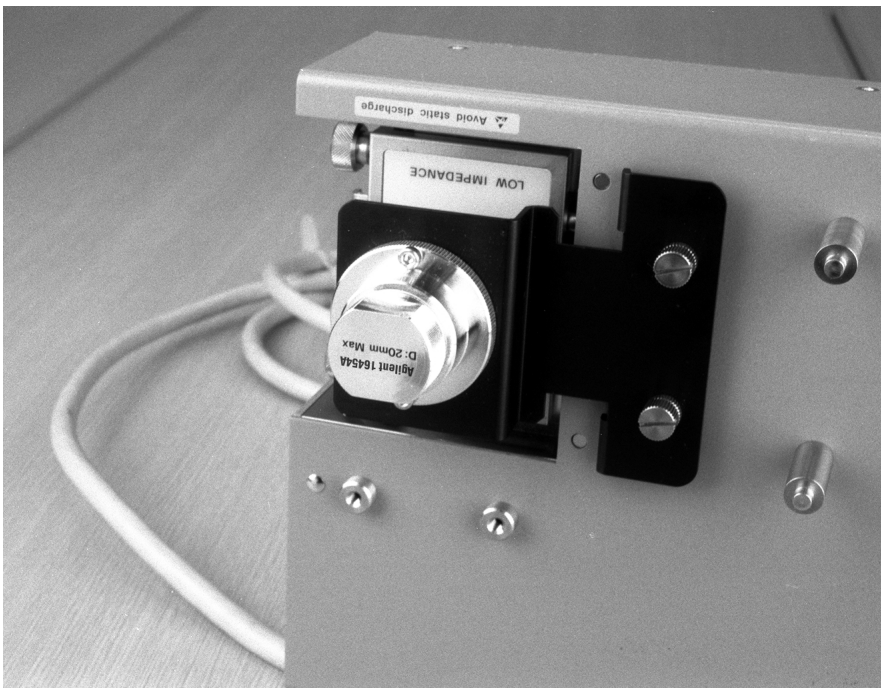
ここでは、透磁率の測定システムとして16454A磁性材料測定電極について解説します。

3.4. 16454A磁性材料測定電極を用いた測定システム

3.4.1. 特長

- 1kHz～1GHzの広い周波数範囲での測定が可能
- トロイダルコアに線を巻く必要がなく測定が簡単
- 2種類の電極により大きさの異なるMUTに対応
- 4291B（オプション002材料解析機能付）及び4294Aのいずれかの測定器との使用が可能。内蔵ソフトウエアまたはIBASICによりパラメータの自動算出及び表示が可能。
- -55℃～+200℃での温度特性評価に最適（4291Bと共に使用時）

*温度特性評価にはオプション014耐熱低インピーダンスヘッドが必要です。オプション014には、高温でも高精度を維持できる耐熱ケーブルと恒温器のコントロールを行うためのIBASICプログラムが含まれています。



使用可能測定器：4291B（オプション002付き）*、4294A+42942A

3.4.2. 適応MUT

測定可能な試料形状はトロイダルコアのみです。図28に適応可能なMUTサイズを示します。

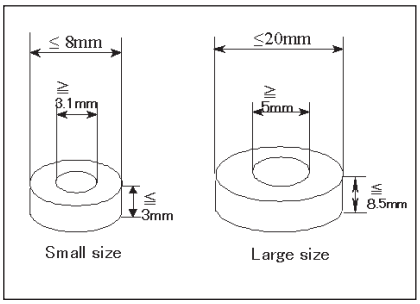
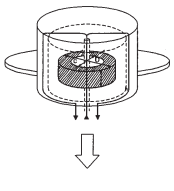


図28　16454A適応可能MUT寸法

3.4.3. 治具構造

図29は16454Aの構造と測定の概念を表わしています。16454Aにトロイダルコアを挿入することで、理想的な（磁束漏れのない）1回巻きインダクタが形成されます。測定では、電極に試料が入っている状態のインダクタクタンス値から透磁率を求めます。



$$\dot{\mu} = \frac{\dot{Z}m}{j\omega\mu_0}\frac{2\pi}{h\ln\frac{c}{b}} + 1$$

$\dot{\mu}$ 複素透磁率
$\dot{Z}m$ 測定インピーダンス
μ_0 真空の透磁率 $4\pi \times 10^{-7}$[H/m]
h 試料の高さ
c 試料の外形
b 試料の内径

図29　16454A構造と測定の概念

3.4.4. 主な仕様

表9　16454Aの主な仕様

周波数	1kHz～1GHz
最大DCデバイス電流	±500mA
温度	-55℃～+200℃*
端子構成	7mm
補正	SHORT

*4291B（オプション014付）使用時

表9は16454Aの主な仕様を示しています。また、図30、図31に測定確度を示します。これらの数値は、測定器込み（4291B、4294A両方に共通）の測定確度を示しています。

3.4.5. 使用方法

図32は16454Aを用いた磁性材料測定のフローチャートを示します。以下に各ステップについて説明します。

ステップ1．測定器の校正：4291Bを使用する場合、7mmコネクタ上で校正を行います。4294Aを使用する場合、42942Aの7mmコネクタ上でSETUPを行います。

ステップ2．16454Aの接続：16454Aを測定器の7mm測定端子に接続します。4291B使用時には、測定治具選択メニューで16454Aを選択します。

ステップ3．16454A残留インピーダンスの補正：16454Aに何も挿入しない状態でSHORT補正を行います。

ステップ4．MUTサイズの入力：MUTサイズを測定器のメニューにしたがって入力します。マイクロ・メーターやノギスで測定し入力します。

ステップ5．MUTの接続：16454AにMUTを挿入します。

ステップ6．測定条件の設定：測定周波数、測定パラメータなどの測定条件を設定します。

ステップ7．MUTの測定：測定結果は測定器の画面に表示されます。マーカ機能などによりデータの解析が可能です。

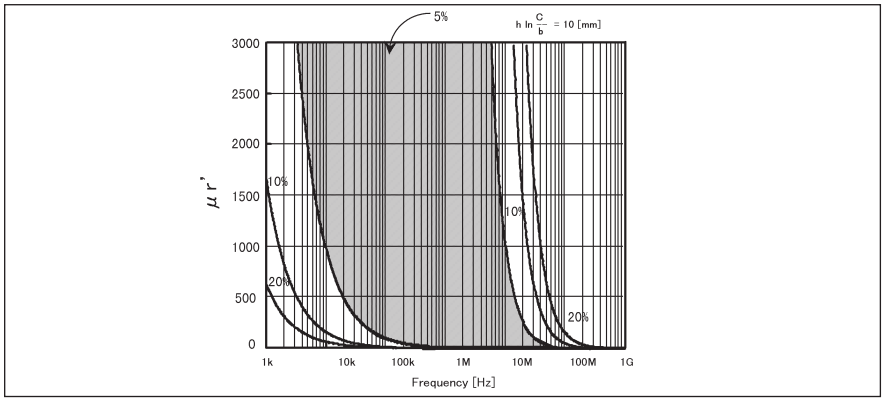


図30　透磁率測定確度（参考データ）

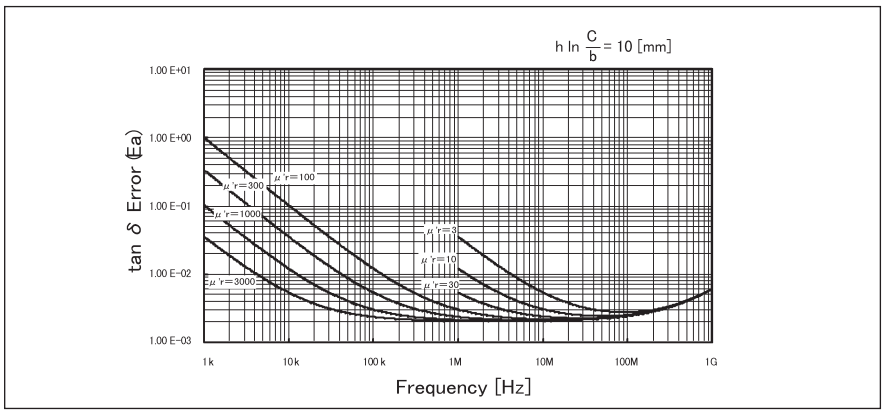


図31　tanδ測定確度（参考データ）

16454Aを4294Aと共に使用する場合は、測定手順を自動化できるプログラムが4294Aの取扱説明書に付属されています。また、4291B（オプション002付）と共に使用する場合は4291Bの内蔵ソフトウエアとして材料測定の機能が付加されています。詳しくは、4291Bの取扱説明書をご覧下しさい。

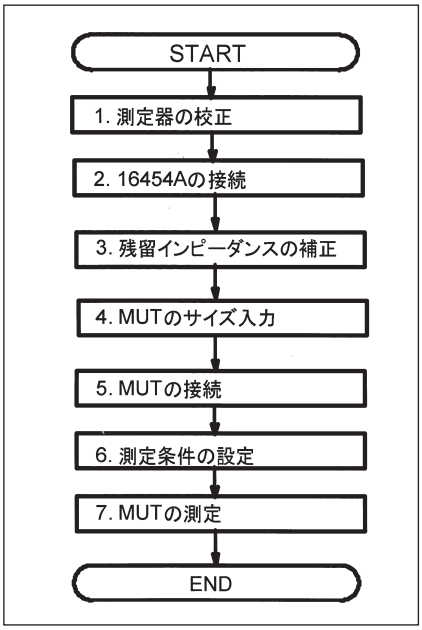


図32　16454A測定手順フローチャート

3.4.6. 使用上の注意

透磁率に加えて高い誘電率をもつ材料を測定する場合（目安として10以上）1GHz近くの高い周波数において正確に測定できない場合があります。16454AではMUTと測定治具で構成される合成インピーダンスのインダクタンス値を測定することで透磁率を求めますが、測定の原理上、測定値は純粋なインダクタンス値である必要があります。材料の誘電率が高い場合は測定治具とMUTの間の空間を通して電流が流れ、等価回路的には容量が並列に入ります。このLCR並列回路は特定の周波数でインピーダンス共振を起こしますが、誘電率が大きいほど低い周波数で共振が発生し、この場合は正確な測定が不可能となります。

3.4.7. 測定例のご紹介

4291Bと16454Aを用いたMnZnフェライトの周波数特性と温度特性評価の測定結果を図33、図34に示します。

同様に、4294Aと16454Aを用いて低周波帯で測定した場合のMnZnフェライトの周波数特性を図35に示しています。

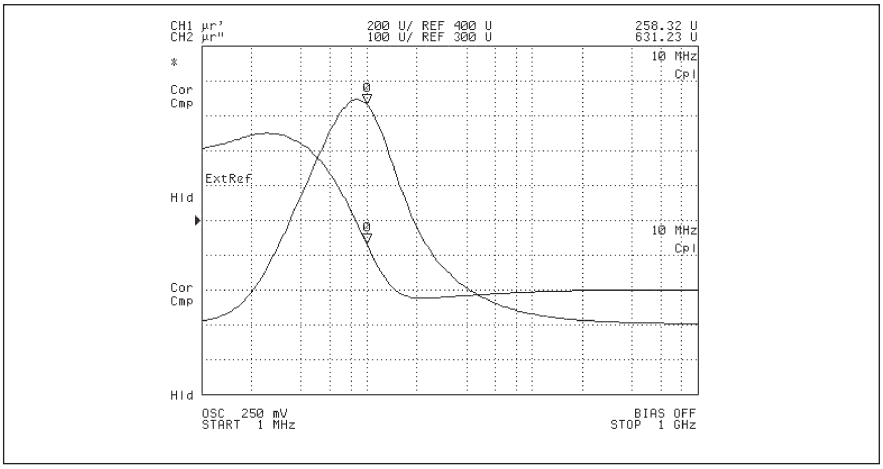


図33　MnZnフェライトの周波数特性

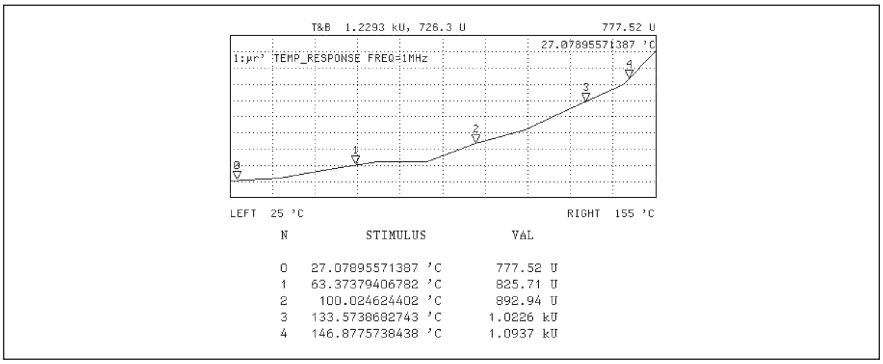
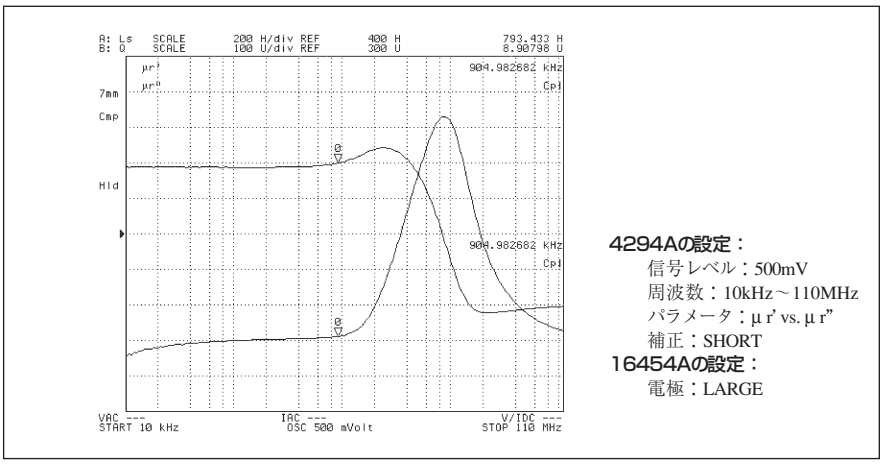


図34　MnZnフェライトの温度特性評価



4294Aの設定：
信号レベル：500mV
周波数：10kHz～110MHz
パラメータ：μr' vs. μr"
補正：SHORT

16454Aの設定：
電極：LARGE

図35　MnZnフェライトの低周波特性

4．おわりに

本アプリケーションノートでは、インピーダンス測定技術を用いて誘電率、透磁率を測定する方法、測定治具について解説しました。

一般に、材料といっても世の中に様々なものが存在し、その形状、誘電率、透磁率の値、サイズなど、それぞれの測定の場面において状況が異なる傾向にあります。そのような状況に対応できるよう本アプリケーションノートでは測定治具の構造、適応MUTサイズ、治具の使い方や注意点などの詳細について解説してきました。本アプリケーションノートを参考に、測定要求に応じたソルーションを選択下さい。

付録

A. 抵抗率評価

A.1. 抵抗率の概念

絶縁材料の評価パラメータとして表面および体積抵抗率があります。一般に体積抵抗率、表面抵抗率を求めるには、１分間充電、さらに測定、放電の操作を行いながら絶縁材料の体積抵抗や表面抵抗の１分値を測定し、得られた測定値から式を用いて算出します。表面および体積抵抗率測定の方法の違いについて図36、図37を用いて解説します。

体積抵抗率の測定（図36）では、対電極に電圧を印加し、主電極に通過した電流から体積抵抗を求めます。体積抵抗、主電極の直径、絶縁材料の厚さで体積抵抗率が算出できます。

表面抵抗率の測定（図37）では、対電極に電圧を印加し、同じ表面上の主電極に向かって流れた電流から表面抵抗を求めます。表面抵抗、主電極と対電極の直径、絶縁材料の厚さで表面抵抗率が算出できます。

それぞれの算出式は次のようになります。

体積抵抗率

$$\rho v = \frac{\pi \times (D_1)^2}{4t} \times Rv$$

表面抵抗率

$$\rho s = \pi \times \frac{(D_2 + D_1)}{(D_2 - D_1)} \times Rs$$

D_1：主電極の直径（m）
D_2：ガード電極の直径（m）
t　：絶縁材料の厚さ
Rv：体積抵抗
Rs：表面抵抗

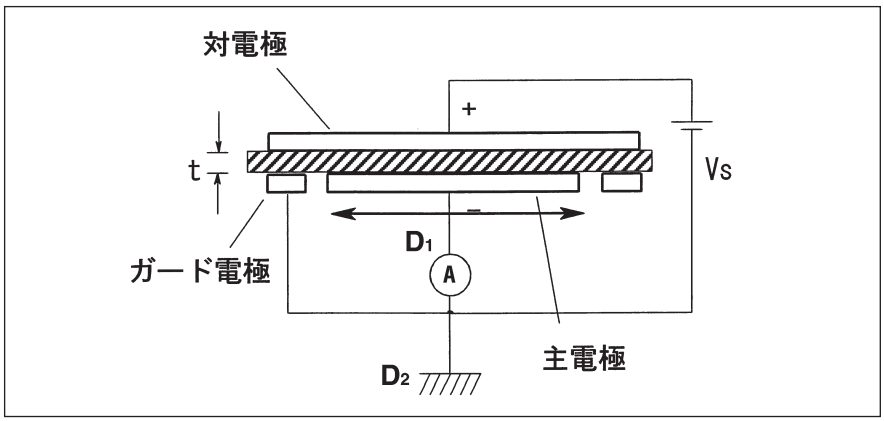


図36　体積抵抗率測定

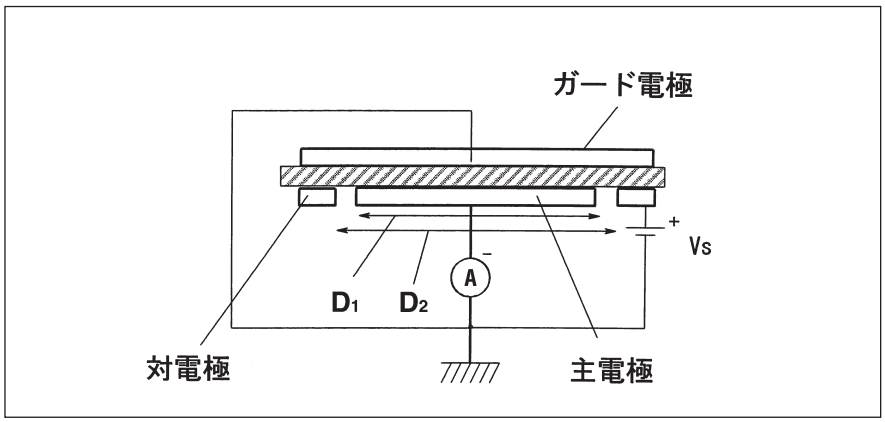


図37　表面抵抗率測定

A.2. Agilent 4339Bと Agilent 16008Bを用いた 抵抗率測定システム

ここでは、4339B絶縁抵抗計と16008Bレジスティビティセルによる抵抗率測定システムについて解説します。

A.2.1. 特長

- 電極サイズ、絶縁材料の厚さの入力により、抵抗率の自動算出が可能
- JIS C-2141、K-6911、C-2318およびASTM D-257などの絶縁材料測定規格に準拠した主電極のサイズ（直径26mm/50mm/76mm）の選択が可能
- 外来ノイズの影響を最小限に抑える構造をもち、$1.6x10^{16}\Omega$までの高抵抗の絶縁材料測定が可能
- テストシーケンスプログラム機能により、充電、測定、放電の自動化が可能
- オープン補正機能は16008B測定治具の浮遊分によるリーク電流を最小限に抑え、信頼性の高い測定を実現

A.2.2. 適応MUT

測定可能な絶縁材料形状は板状で固体の材料です。16008Bには3種類の異なるサイズの電極が用意され、様々なサイズの絶縁材料に対応します。詳細を表10に示します。ガード電極直径が絶縁材料の外側に収まるように電極を選択して下さい。なお、厚さについては10μm～10mmに対応します。

表10　16008B適応MUT寸法

D1	D2	D3	詳細	D
主電極	ガード電極（内形）	ガード電極（外形）	–	絶縁材料形状
26mm	38mm	48mm	オプション. 001/002に付属	50mm*～125mm
50mm	70mm	80mm	標準装備	82mm*～125mm
76mm	88mm	98mm	オプション. 001/003に付属	100mm*～125mm

*ガード電極（外形）+2mm

A.2.3. 治具構造

16008Bレジスティビティセルは外来ノイズを受けにくくし高電圧に対する安全性を確保するためのカバー、安定な接触を得るための電極、表面抵抗率、体積抵抗率の切り替えを行うスイッチから構成されます。絶縁材料にかかる圧力の設定ができますので、絶縁材料の材質に応じた適切な接触が可能です（最大加圧範囲は10kgf）。

A.2.4. 主な仕様

表11、表12に4339Bと16008Bによる抵抗率測定の主な仕様を示します。

表11　4339B+16008Bシステムの主な仕様

周波数	DC
最大電圧	1000V
最大電流	10mA
温度	–30～+100℃（コネクタ）
端子構成	トライアキシァル電流入力端子、 高電圧出力BNC、 インタロック制御端子
ケーブル長さ	1.2m
補正	OPEN

表12　抵抗率の測定範囲（参考データ）

	測定範囲
体積抵抗率	≦$4.0\times10^{18}\,\Omega$cm
表面抵抗率	≦$4.0\times10^{17}\,\Omega$

A.2.5. 使用方法

図38は16008Bと4339Bを用いた抵抗率測定の基本的な手順を示しています。以下に、各ステップについての説明を行います。さらに詳しい説明については4339Bの取扱説明書を参照下さい。

ステップ1．電極の選択：MUTの直径と厚さによって主電極とガード電極を選びます。16008Bのカバーをあけ、主電極とガード電極をセットします。

ステップ2．フィクスチャの接続：16008Bを4339BのUNKNOWN端子に接続します。

ステップ3．測定パラメータ（Rv/Rs）の選択：16008Bのセレクタスイッチを切替えることで、Rs（表面抵抗率）もしくはRv（体積抵抗率）の測定モードを選択します。

ステップ4．印加電圧値の入力：MUTに印加したい電源電圧値を4339Bに入力します。

ステップ5．4339Bの自己校正の実施：4339Bの自己校正を行います。

ステップ6．OPEN補正の実施：出力電圧をONにして、OPEN補正を行います。補正後は、出力電圧をOFFに戻します。

ステップ7．MUTの接続：16008BにMUTを接続します。

ステップ8．表示パラメータの選択と電極サイズの入力：表示させる測定パラメータ、電極サイズなどの情報を4339Bに入力します。

ステップ9．テスト・シーケンス・プログラムの設定：パラメータ、充電時間、測定モードを選択します。

ステップ10．MUTの測定：テスト・シーケンス・プログラムを用いて測定を行うことにより、設定した充電時間の充電後、測定が行われます。

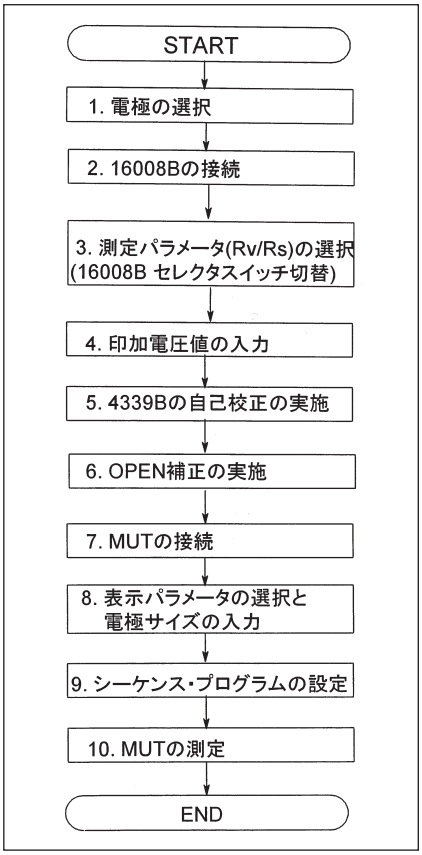


図38　4339Bと16008B　測定手順フローチャート

A.2.6. 使用上の注意

- 一般に絶縁材料の測定はノイズなどの影響を受けやすく、不安定になる傾向がなります。4339Bと16008Bの測定システムでは外来ノイズの影響を受け難い構造になっているものの、精度が要求される測定では以下の点に注意する必要があります。
- 測定リードを動かさない。
- 振動を与えない。
- ノイズを発生させる機器近くでの測定は避ける。
- 電極をきれいに保つ。

A.2.7. 測定例のご紹介

図39はポリイミドの表面抵抗率及び体積抵抗率の測定例を示しています。

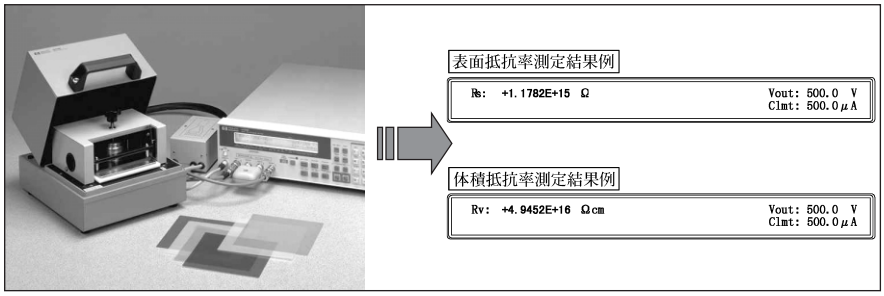


図39　ポリイミドの表面および体積抵抗率測定

B.　液体の誘電率評価

液体の特性評価にしばしば誘電率測定が用いられます。誘電率測定は、物質の成分を変えずしかも非常に短時間で簡単に評価ができることから、幅広い分野での利用のための研究が行われています。ここではインピーダンス測定技術と容量法を用いた液体の誘電率測定として、Agilent 16452A液体測定電極について解説します。

B.1.　16452A液体測定電極を用いた測定システム

B.1.1.　特長

- 20Hz～30MHzの測定周波数範囲
- プラスチックの樹脂、石油化学製品のような液体物質の測定が可能
- 少量の液体物質で測定が可能なので、MUTを無駄にしない
- －20℃～+125℃の温度範囲での使用が可能。温度特性評価に最適。
- 4端子構成をもつインピーダンス測定器との使用が可能

B.1.2.　適応MUT

電極の間隔をスペーサによって調整できる構造をもち、使用する液体の容量を変えることが可能です。表13に詳細を示します。

B.1.3.　治具構造

16452Aの構造を図40に示します。液体物質の注入、排出、電極の洗浄が安易にできる構造になっています。高い耐蝕性を実現するために、電極分はNiメッキ、防水リングはバイトン（フッ素ゴム）を使用しています。

また、測定器に接続するための1mケーブルが必要となります。使用できるケーブルを表14に示します。

表14　16452Aに適合する1mケーブル

温度	P/N
0～55℃	Agilent 16048A
–20～125℃	16452–61601
–20～125℃	Agilent 16048G（4294Aのみ）

使用可能測定器：4194A, 4284A, 4285A, 4294A

表13　スペーサと液体容量の関係

液体物質容量	3.4ml	3.8ml	4.8ml	6.8ml
空気容量（液体が無い時）	34.9pF ±25%	21.2pF ±15%	10.9pF ±10%	5.5pF ±10%
使用するスペーサー	1.3mm	1.5mm	2mm	3mm

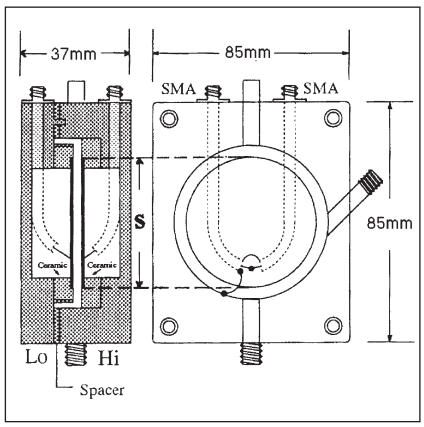


図40　16452A構造

B.1.4. 主な仕様

表15　16452Aの主な仕様

周波数	20Hz～30MHz
最大電圧	42V
温度	–20℃～+125℃
端子構成	4端子対、SMAコネクタ
補正	SHORT

16452Aの主な仕様を表15に示します。また、測定誤差は以下の式で計算できます。

測定誤差=A+B+C［%］

誤差A：表16参照。。
誤差B：εr=1の場合。図41参照
誤差C：測定器の測定誤差

表16　誤差A

使用スペンサー（mm）	B（%）
1.3	0.005×比誘電率
1.5	0.006×比誘電率
2.0	0.008×比誘電率
3.0	0.020×比誘電率

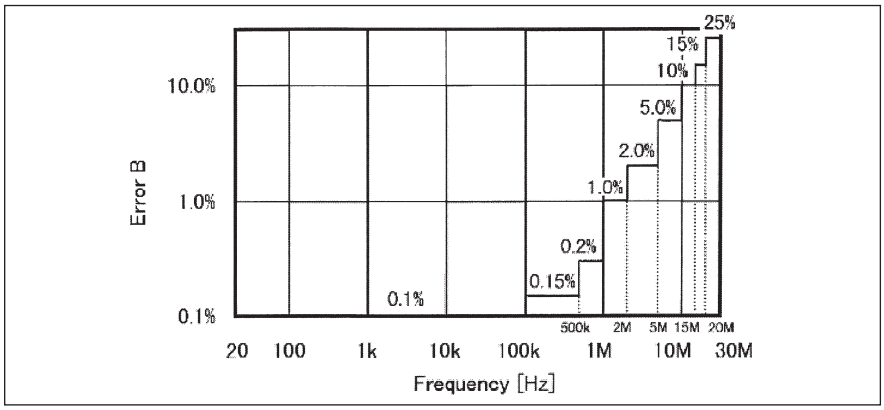


図41　比誘電率測定確度（代表値）

B.1.5. 使用方法

16452Aを用いた液体の誘電率測定の基本的な手順を図42に示します。各ステップについて以下に説明します。

ステップ1．16452Aのアセンブリとショートプレートのセット：ショートプレートを挿入しながらHigh側電極とLow側電極をアセンブリし、ショート状態を作ります。また、ケーブル接続のための変換アダプタ、液体の排出口のキャップなどをし、16452Aを使う準備をします。

ステップ2．16452Aの測定器への接続：使用温度や測定器に応じて適切な1mケーブルを選択し、16452Aを測定器のUNKNOWN端子に接続します。

ステップ3．ケーブル長補正：1mケーブルを使用するための設定を測定器上で行います。その方法は測定器に依存し、詳細は使用する測定器の取扱説明書に記載されています。

ステップ4．16452Aのショート残留分のチェック：SHORT補正に先立ち、16452Aが正しくアセンブリされているかをチェックするため、1MHzでSHORTを測定し規定内の値に入っていることを確認します。詳細は16452Aの取扱説明書に記載されています。

ステップ5．測定条件の設定：測定周波数、信号レベルなど測定条件の設定を行います。さらに、測定パラメータをCp-Rpに設定します。詳しくは使用する測定器の取扱説明書を参照下さい。

ステップ6．SHORT補正の実行：ショートプレートを入れたままの状態でSHORT補正を実行します。

ステップ7．空気容量の測定：ショートプレートを取り外し、測定する液体の量に合ったスペーサのみを挿入した状態で、電極間に存在する空間のパラメータCp-Rpを測定します。

ステップ8．液体の注入：注入口から液体をいれます。

ステップ9．液体の測定：液体を入れた状態で再度Cp-Rpを測定します。

ステップ10．誘電率の算出：誘電率及び誘電損失を以下の式を用いて計算します。

$$\varepsilon r = \frac{Cp}{Co} - \left(\frac{1}{2\pi f} \times Co \times Rp\right)$$

Cp：試料のキャパシタンス値［F］
Co：空気のキャパシタンス［F］
Rp：試料の抵抗値［Ω］
f：測定周波数［Hz］

ステップ11．液体の排出：排出口から液体を出します。

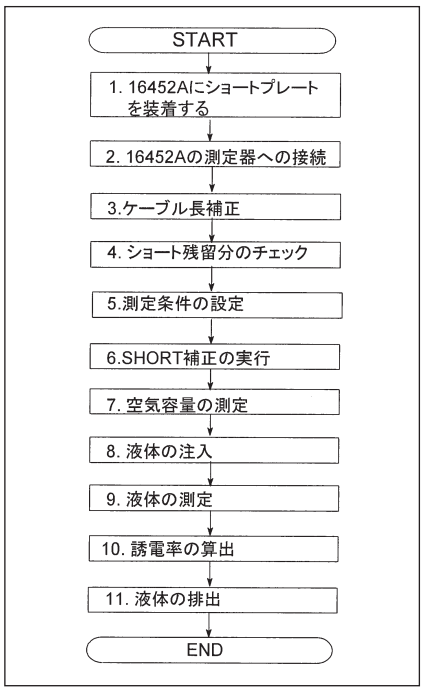


図42　16452Aの測定手順フローチャート

B.1.6. 使用上の注意

一般的な注意点として、導伝率またはコンダクタンスの高いイオン性の液体物質（例えばNa+Cl-）などは測定できない可能性があります。電極間で誘電分極が発生し、正しい容量値の測定ができなくなることに起因します。

アジレント・テクノロジー株式会社
本社 〒192-8510 東京都八王子市高倉町9-1

計 測
お客様窓口

受付時間 9:00～17:00
（土・日・祭日を除く）
※FAXは24時間受付け

TEL 0120-421-345
(0426-56-7832)
FAX 0120-421-678
(0426-56-7840)
E-mail:mac_support@agilent.com

電子計測ホームページ
http://www.agilent.co.jp/find/tm

● 記載事項は変更になる場合があります。
ご発注の際はご確認ください。

Agilent Technologies
Innovating the HP Way

21-2002
010003301-H